

Научная статья

УДК 630*372/375

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-5-126-134

Расчет коэффициента сцепления колесного движителя лесной машины с почвогрунтом

Е.Г. Хитров¹, д-р техн. наук; ResearcherID: [R-8199-2016](https://orcid.org/0000-0003-4569-9508),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4569-9508>

И.С. Должиков², канд. техн. наук; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2738-0483>

А.С. Дмитриев³, инж.; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3095-6014>

В.А. Каляшов², канд. техн. наук; ResearcherID: [ABA-9692-2021](https://orcid.org/0000-0002-8145-7058),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8145-7058>

И.В. Григорьев⁴, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [S-7085-2016](https://orcid.org/0000-0002-5574-1725),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

О.И. Григорьева⁵, канд. с.-х. наук, доц.; ResearcherID: [AAC-9570-2020](https://orcid.org/0000-0001-5937-0813),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>

¹Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, д. 29, Санкт-Петербург, Россия, 195251; yegorkhitrov@gmail.com

²Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, ул. 2-я Красноармейская, д. 4, Санкт-Петербург, Россия, 190005; idolzhikov222@mail.ru, vit832@yandex.ru

³АО «Гипростроймост – Санкт-Петербург», ул. Яблочкова, д. 7, Санкт-Петербург, Россия, 197198; dmitriev.nauka@mail.ru

⁴Арктический государственный агротехнологический университет, ш. Сергеляхское, 3-й км, д. 3, г. Якутск, Россия, 677007; silver73@inbox.ru

⁵Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет им. С.М. Кирова, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 194021; grigoreva_o@list.ru

Поступила в редакцию 13.06.22 / Одобрена после рецензирования 10.09.22 / Принята к печати 14.09.22

Аннотация. Вопросы эксплуатационной и экологической эффективности колесных и гусеничных лесных машин рассматриваются в рамках направления, а ранее отдельной научной специальности, «Технология и машины лесозаготовок и лесного хозяйства» достаточно давно. Данное направление взяло начало из трудов специалистов в области механизации сельского хозяйства, детально изучавших взаимосвязи в системе «двигатель–почва–урожай». И в сельскохозяйственном, и в лесозаготовительном производствах при рассмотрении взаимодействия движителей лесных машин с поверхностью движения широко использовались и используются методы механики грунтов. Однако лесные почвогрунты являются значительно более сложной для теоретического и экспериментального изучения средой, поскольку имеют ярко выраженную слоистую структуру, включающую органические и неорганические составляющие, и к тому же пронизаны корневой системой древесно-кустарниковой растительности. В настоящее время в лесозаготовительном производстве и лесном хозяйстве доминируют колесные лесные машины различного класса тяги, что связано с их универсальностью, большими эксплуатационными скоростями, возможностью перемещения между лесосеками своим ходом, включая перемещение по дорогам общего пользования. Несмотря на значительный объем теоретических и экспериментальных исследований, выполненных отече-

ственными и зарубежными учеными в области взаимодействия движителей колесных машин с лесными почвогрунтами, до настоящего времени остались слабо проработаны вопросы взаимосвязи шага грунтозацепов и сцепления движителя с почвогрунтом. Это связано в первую очередь с тем, что оценка проходимости машины по сцеплению дается после анализа показателей колееобразования и сопротивления движению. Данная статья направлена на теоретическое решение этого вопроса, развитие подхода к теоретической оценке коэффициента сцепления колесного движителя лесной машины с почвогрунтом.

Ключевые слова: почвогрунты, лесные машины, колееобразование, уплотнение, колесные движители, коэффициент сцепления

Благодарности: Работа выполнена в рамках научной школы «Инновационные разработки в области лесозаготовительной промышленности и лесного хозяйства» Арктического государственного агротехнологического университета. Исследование проведено за счет гранта Российского научного фонда № 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

Для цитирования: Хитров Е.Г., Должиков И.С., Дмитриев А.С., Каляшов В.А., Григорьев И.В., Григорьева О.И. Расчет коэффициента сцепления колесного движителя лесной машины с почвогрунтом // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 5. С. 126–134. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-126-134>

Original article

Calculation of the Coefficient of Adhesion of the Forest Machine Wheeled Mover with Soil

*Egor G. Khitrov*¹, Doctor of Engineering; ResearcherID: [R-8199-2016](https://orcid.org/0000-0003-4569-9508),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4569-9508>

*Ilya S. Dolzhikov*², Candidate of Engineering; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2738-0483>

*Alexander S. Dmitriev*³, Engineer; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3095-6014>

*Vitaly A. Kalyashov*², Candidate of Engineering; ResearcherID: [ABA-9692-2021](https://orcid.org/0000-0002-8145-7058),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8145-7058>

*Igor V. Grigorev*⁴✉, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [S-7085-2016](https://orcid.org/0000-0002-5574-1725),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5574-1725>

*Olga I. Grigoreva*⁵, Candidate of Agriculture, Assoc. Prof.; ResearcherID: [AAC-9570-2020](https://orcid.org/0000-0001-5937-0813),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5937-0813>

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Politechnicheskaya str., 29, St. Petersburg, 195251, Russian Federation; yegorkhitrov@gmail.com

²St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, 2nd Krasnoarmeyskaya str., 4, St. Petersburg, 190005, Russian Federation; idolzhikov222@mail.ru, vit832@yandex.ru

³Giprostroy-most-Saint Petersburg JSC, Yablochkova str., 7, Saint Petersburg, 197198, Russian Federation; dmitriev.nauka@mail.ru

⁴Arctic State Agrotechnological University, 3rd km, 3, sh. Sergelyakhskoye, Yakutsk, 677007, Russian Federation; silver73@inbox.ru✉

⁵St. Petersburg State Forest Technical University named after S.M. Kirov, Institutsky per., 5, St. Petersburg, 194021, Russian Federation; grigoreva_o@list.ru

Received on June 13, 2022 / Approved after reviewing on September 10, 2022 / Accepted on September 14, 2022

Abstract. The issues of operational and ecological efficiency of wheeled and tracked forest machines have been addressed within the framework of the direction, and previously a separate scientific specialty “Technology and machines of logging and forestry” for a long time now. This direction originated from the works of specialists in the field of agricultural mechanization, who studied the interrelationships in the “mover-soil-harvest” system in detail. Both in agricultural and logging production, when considering the interaction of forest machine movers with the driving surface, the methods of soil mechanics were and are widely used. However, forest soils are a much more complicated environment for theoretical and experimental study, as they have a pronounced layered structure, including organic and inorganic components, and, moreover, are penetrated by the root system of woody and shrubby vegetation. At present, wheeled forest machines of various traction classes dominate in logging production and forestry, which is due to their versatility, high operating speeds, the ability to move between harvesting areas on their own, including moving on public roads. Despite the considerable amount of theoretical and experimental research carried out by domestic and foreign scientists in the field of interaction of wheeled machines with forest soils, the issues of interrelation between the pitch of the ground hooks and the coupling of the mover with the soil have remained poorly worked out so far. This is due, first of all, to the fact that the evaluation of the machine’s passability by traction is given after evaluating the indicators of rutting and resistance to movement. This article is aimed at the theoretical solution of this issue, at the development of the approach to the theoretical assessment of the coefficient of adhesion of the wheeled mover of a forest machine with a soil.

Keywords: soils, forest machines, tracking, compaction, wheeled movers, coefficient of adhesion

Acknowledgments: The work was carried out within the framework of the scientific school “Innovative developments in the field of logging industry and forestry” of the Arctic State Agrotechnological University. The research was carried out at the expense of the grant of the Russian Science Foundation No. 23-16-00092, <https://rscf.ru/project/23-16-00092/>.

For citation: Khitrov E.G., Dolzhikov I.S., Dmitriev A.S., Kalyashov V.A., Grigorev I.V., Grigoreva O.I. Calculation of the Coefficient of Adhesion of the Forest Machine Wheeled Mover with Soil. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 5, pp. 126–134. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-126-134>

Введение

Экологическая и экономическая эффективность лесозаготовительного производства, а также большей части лесохозяйственных работ, на которых задействуются лесные машины, во многом зависит от экологической и эксплуатационной эффективности работы применяемых лесных машин [2, 9, 10, 15, 20, 21]. При этом работа лесных машин определяется соответствием параметров их конструкции природно-производственным условиям эксплуатации [6–8, 16, 17], которые даже на одних и тех же участках лесного фонда могут варьировать в очень широком диапазоне [3–5, 14, 18, 19].

Методы механики грунтов [1] нашли широкое применение в решении задач лесоинженерного дела [11]. Были разработаны и апробированы математические модели, предназначенные для расчета тягово-цепных свойств колесных и гусеничных машин, показателей колеобразования и уплотнения лесных грунтов. Учтены различные параметры движителей, относящиеся к их геометрии, нагрузке, времени воздействия на лесной грунт. Однако до настоящего времени слабо проработаны вопросы связи шага грунтозацепов на сцепление движителя

с грунтом. Это обусловлено в первую очередь тем, что оценка проходимости машины по сцеплению дается после оценки показателей колееобразования и сопротивления движению. Таким образом, для изучения отмеченных вопросов нужны верифицированные научные сведения, полученные сравнительно недавно. Кроме того, следует отметить сложность оценки сцепления, связанную с реализацией математических моделей и объемом вычислений [11, 12].

Статья направлена на развитие подхода к теоретической оценке коэффициента сцепления колесного движителя лесной машины с почвогрунтом.

Объекты и методы исследования

Теоретическую основу исследования составляют положения механики грунтов [1]. Форма пятна контакта эластичного движителя с деформируемым грунтом принята прямоугольной с постоянной шириной и переменной длиной, определяемой с помощью модели [12], прогнозирующей глубину колеи с учетом свойств грунта и движителя. Свойства почвогрунта задаются в зависимости от категории прочности по [13]. Все вычисления реализованы в системе компьютерной математики Maple 2017.

Результаты исследования и их обсуждение

Сила сцепления F_t определяется интегрированием функции сопротивления сдвигу по площади пятна контакта. Если принять, что ширина пятна контакта постоянна, то задача упростится [1, 11]:

$$F_t = b \int_0^l \tau(x) dx, \quad (1)$$

где b – ширина пятна контакта, условно равная ширине колеса или гусеницы; l – длина пятна контакта; $\tau(x)$ – функция сопротивления сдвигу вдоль пятна контакта; x – координата, отсчитываемая вдоль пятна контакта.

Для определения функции сопротивления сдвигу $\tau(x)$ рассмотрим связь напряжения сдвига τ и деформации j . Выражение деформации сдвига составим как произведение линейной части j_0 и множителя ζ , учитывающего нелинейность при развивающемся срезе грунта [1]:

$$j = j_0 \zeta, \quad (2)$$

причем [1]

$$j_0 = \frac{\tau}{G} t; \quad \zeta = \frac{\tau_m}{\tau_m - \tau}, \quad (3)$$

где G – модуль сдвига; t – шаг грунтозацепов; τ_m – параметр, характеризующий прочность грунта при сдвиге.

Коэффициент ζ в формуле (2) можно рассматривать как своего рода аналог коэффициента учета потери несущей способности в модели для расчета глубины колеи.

Тогда, решив уравнение (2) с учетом (3) относительно τ , запишем:

$$\tau = \frac{1}{\frac{1}{\tau_m} + \frac{t}{Gj}}.$$

Характеристику прочности грунта при сдвиге введем с учетом его ослабления при развивающемся срезе [1]:

$$\tau_m = p \operatorname{tg} \varphi + C \xi, \quad (4)$$

где p – среднее давление по пятну контакта; φ – угол внутреннего трения; C – удельное сцепление грунта; ξ – коэффициент, учитывающий снижение прочности грунта при срезе.

Коэффициент ξ введем следующим образом:

$$\xi = \left\{ \left(1 - \frac{j - j_m}{t} \right) \operatorname{He}(j_m - j) \right\} \operatorname{He} \left\{ \left(1 - \frac{j - j_m}{t} \right) \operatorname{He}(j_m - j) \right\}, \quad (5)$$

где j_m – деформация сдвига, соответствующая срезу грунта [19],

$$j_m = t \frac{\tau_{\max}}{G} \left(\sqrt{\frac{G}{C}} - 1 \right), \quad (6)$$

τ_{\max} – прочность грунта на срез [1],

$$\tau_{\max} = p \operatorname{tg} \varphi + C. \quad (7)$$

Физический смысл (4)–(7) следующий: по мере развития деформации j сопротивление сдвигу τ , связанное с удельным сцеплением грунта C , снижается, причем пропорционально j , в определенный момент слой грунта оказывается срезан и далее сопротивление τ обусловлено только его фрикционными свойствами φ . Результаты расчетов при $j = 0,14$ м, $p \approx p_s$ (p_s – несущая способность) на примере лесного почвогрунта со свойствами, указанными в таблице, приведены на рис. 1.

Свойства лесного почвогрунта, использованные при расчете коэффициента сцепления [12, 13]

Properties of forest soil used in the calculation of the adhesion coefficient [12, 13]

Параметр	Лесной почвогрунт		
	слабонесущий (III категория)	средней прочности (II категория)	прочный (I категория)
G , МПа	2,193	2,439	2,771
C , МПа	0,0053	0,0108	0,0252
φ , ...°	11,57	13,67	16,69

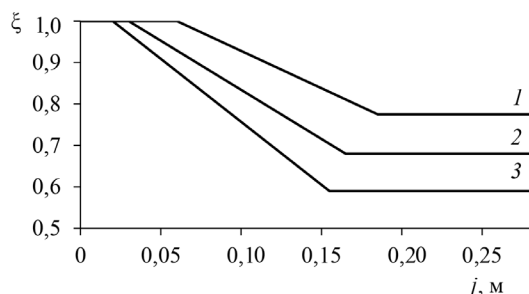


Рис. 1. Снижение сцепления лесного почвогрунта при развивающемся срезе (1 – III категория; 2 – II категория; 3 – I категория)

Fig. 1. The decrease in the adhesion of forest soil with a developing cut (1 – category I, 2 – category II, 3 – category III)

Деформация сдвига принимается по формуле [1]

$$j = Sx, \quad (8)$$

где S – коэффициент буксования движителя.

После подстановки (4)–(8) в формулу (3) получим функцию $\tau = \tau(x)$. Помимо параметров грунта C , φ , G , пятна контакта b , l , p , в (3) используется S , t .

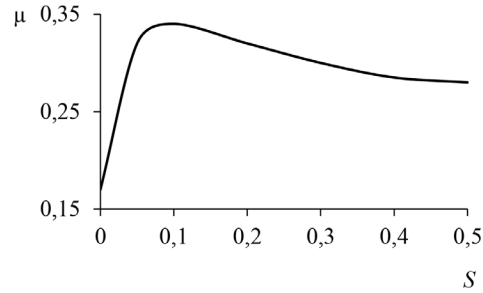
На рис. 2 показан пример результатов расчета, иллюстрирующий связь S и коэффициента сцепления [1]

$$\mu_t = \frac{F_t}{G_w},$$

где G_w – вес машины, отнесенный к единичному движителю.

Рис. 2. Связь коэффициента буксования и коэффициента сцепления (лесной почвогрунт II категории)

Fig. 2. Correlation between slipping coefficient and adhesion coefficient (II category forest soil)



Расчет выполнен для II категории лесного почвогрунта при $b = 0,7$ м, $G_w = 0,035$ МН, $t = 0,14$ м, $l = 0,648$ м (длина пятна контакта по модели при $d = 1,333$ м, давлении в шине $p_w = 0,35$ МПа).

Важно отметить, что на практике прямо управлять значением S невозможно; буксование возникнет в соответствии со сдвигом почвогрунта и определится из условия

$$F_t = F_R, \quad (9)$$

где F_R – сила сопротивления движению машины, отнесенная к единичному движителю,

$$F_R = b \int_0^h p(h) dh, \quad (10)$$

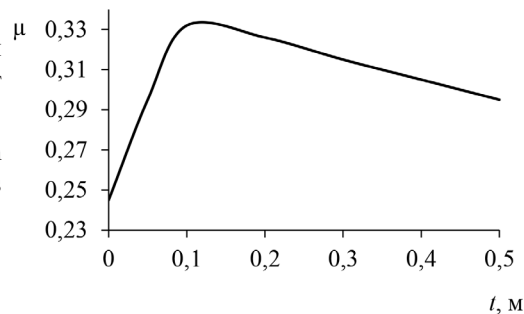
h – глубина колеи.

Таким образом, для оценки возникающего буксования движителя нужно решить уравнение (9) с учетом (1), (10) относительно S . Задача решается численно, при этом F_R определяется с помощью модели для расчета глубины колеи h и длины пятна контакта l при заданных b , p_w , G_w и параметрах грунта по [11]. Решение задачи представляет собой масштабный вычислительный эксперимент и, вероятно, составляет перспективное направление дальнейших исследований.

Однако известны рекомендации принимать в практических расчетах S равным 0,1 [11]. Тогда связь коэффициента сцепления μ , и шага грунтозацепов t , согласно проведенным расчетам, имеет вид графика, показанного на рис. 3.

Рис. 3. Связь коэффициента сцепления и шага грунтозацепов (лесной почвогрунт II категории)

Fig. 3. Correlation between adhesion coefficient and the pitch of ground hooks (II category forest soil)



Заключение

Полученный результат показывает, что при коэффициенте буксования движителя 0,1 максимальному значению коэффициента сцепления соответствует шаг грунтозацепов, примерно равный 0,14 м. Это хорошо согласуется с практическим опытом производителей шин для лесной техники и свидетельствует об адекватности предложенной модели в рассмотренном случае.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. Агейкин Я.С. Проходимость автомобилей. М.: Машиностроение, 1981. 232 с. Ageikin Ya.S. *Passability of Cars*. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981. 232 p. (In Russ.).
2. Бурмистрова О.Н., Тетеревлева Е.В., Куницкая О.А. Моделирование взаимодействия колесного движителя сверхнизкого давления со слабонесущей опорной поверхностью // Системы. Методы. Технологии. 2019. № 4(44). С. 95–101.
Burmistrova O.N., Teterevleva E.V., Kunitskaya O.A. Modeling of Interaction of an Ultra-low Pressure Wheeled Mover with a Weakly Bearing Support Surface. *Systems. Methods. Technologies*, 2019, no. 4(44), pp. 95–101. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2019-4-95-101>
3. Васильев А.И., Добрецов Р.Ю. Современные методы проведения испытаний с помощью комплексов для интерактивного моделирования // Транспортные системы: междунар. науч. онлайн-конф., 28 окт. 2021 г. / СПбПУ Петра Великого. СПб.: Политех-Пресс, 2021. С. 39–43.
Vasiliev A.I., Dobretsov R.Yu. Modern Methods of Testing Using Complexes for Interactive Modeling. *Transport systems. International Online Scientific Conference*. Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University. St. Petersburg, Politeh-Press Publ., 2021, pp. 39–43. (In Russ.).
4. Добрецов Р.Ю., Костромин М.В., Костромин Н.М. Принципы получения характеристик грунта и траектории движения для гусеничного шасси в рамках концепции автоматизации подвижности // Актуальные проблемы защиты и безопасности: тр. XXIV Всерос. науч.-практ. конф., 31 марта – 3 апр. 2021 г. РАРАН: в 7 т. Т. 1. СПб.: НПО Спецматериалов, 2021. С. 368–375.
Dobretsov R.Yu., Kostromin M.V., Kostromin N.M. Principles of Obtaining Soil Characteristics and Movement Trajectories for a Tracked Chassis within the framework of the Mobility Automation Concept. *Current protection and security issues*. Proceedings of the XXIV All-Russian Scientific and Practical Conference RARAN. In 7 volumes. St. Petersburg, RPA Spetsmaterialov Publ., 2021, pp. 368–375. (In Russ.).
5. Костромин Н.М., Добрецов Р.Ю., Костромин М.В. Методика оценки основных параметров грунта при использовании шасси-анализатора // Автомобилестроение: проектирование, конструирование, расчет и технологии ремонта и производства: материалы V Всерос. науч.-практ. конф., Ижевск, 29–30 апр. 2021 г. / под ред. Н.М. Филькина. Ижевск: УИР ИжГТУ им. М.Т. Калашникова, 2021. С. 203–208.
Kostromin N.M., Dobretsov R.Yu., Kostromin M.V. Methodology for Estimation of Basic Soil Parameters Using a Chassis Analyzer. *Automotive engineering: design, construction, calculation and repair and production technologies*. Materials of the V All-Russian Scientific and Practical Conference. Izhevsk, 2021, pp. 203–208. (In Russ.).
6. Костромин Н.М., Костромин М.В., Добрецов Р.Ю. Обоснование создания колесного шасси-анализатора для получения характеристик грунта взлетно-посадочных полос и дорог общего пользования // Актуальные проблемы защиты и безопасности: тр. XXV Всерос. науч.-практ. конф., 4–7 апр. 2022 г.: в 6 т. Т. 1. СПб.: НПО Спецматериалов, 2022. С. 396–400.

Kostromin N.M., Kostromin M.V., Dobretsov R.Yu. Justification for the Creation of a Wheeled Chassis Analyzer for Obtaining Characteristics of Soil of Runways and Public Roads. *Current protection and security issues*. Proceedings of the XXV All-Russian Scientific and Practical Conference. Saint Petersburg, RPA Spetsmaterialov Publ., 2022, pp. 396–400. (In Russ.).

7. Кузнецов Д.А., Демидов Н.Н., Добрецов Р.Ю. Адаптация вально-планетарной трансмиссии к использованию на колесном тракторе семейства «Кировец» // Транспортные системы: сб. материалов Междунар. науч. онлайн-конф. для молодых ученых и аспирантов, 29 нояб. 2022 г. СПб.: Политех-Пресс, 2023. С. 11–16.

Kuznetsov D.A., Demidov N.N., Dobretsov R.Yu. Adaptation of the Shaft-Planetary Transmission for Use on the Kirovets Wheeled Tractor Family. *Transport systems. Collection of materials of the International Scientific Online Conference for young scientists and postgraduates*. Saint Petersburg, 2023, pp. 11–16. (In Russ.). <https://doi.org/10.18720/SPB-PU/2/id23-3>

8. Кузнецов Д.А., Добрецов Р.Ю. Вально-планетарный трансформирующий механизм для лесных и транспортных машин // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы Восьмой Всерос. нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Петрозаводск: ПетрГУ, 2022. С. 92–94.

Kuznetsov D.A., Dobretsov R.Yu. Shaft-planetary Transformer for Forestry and Transport Machines. *Improving the efficiency of the forest complex. Materials of the Eighth All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation*. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2022, pp. 92–94. (In Russ.).

9. Куницкая О.А., Макуев В.А., Стародубцева Т.Н., Калита Г.А., Ревяко С.И., Тимохов Р.С. Проблемы повышения качества отечественного лесного машиностроения // Системы. Методы. Технологии. 2022. № 4(56). С. 57–63.

Kunitskaya O.A., Makuev V.A., Starodubtseva T.N., Kalita G.A., Revyako S.I., Timokhov R.S. Problems of Improving the Quality of Domestic Forestry Engineering. *The system. Methods. Technologies*, 2022, no. 4(56), pp. 57–63. (In Russ.). <https://doi.org/10.18324/2077-5415-2022-4-57-63>

10. Скубак А.С., Синов А.Д., Макаров А.А., Анохин Р.А., Виноградова Е.А., Суворов С.А., Шапиро В.Я. Автоматизация расчетов глубины колеи при воздействии форвадера на оттаивающий почвогрунт // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2022. Вып. 62. С. 280–283.

Skubak A.S., Sinov A.D., Makarov A.A., Anokhin R.A., Vinogradova E.A., Suvorov S.A., Shapiro V.Ya. Automation of Track Depth Calculations under the Influence of Forwarder on Thawing Soil. *Current problems of the forest complex*, 2022, iss. 62, pp. 280–283. (In Russ.).

11. Хитров Е.Г., Андронов А.В., Хахина А.М., Григорьев Г.В. Математические модели взаимодействия движителей машин с грунтами // Resources and Technology. 2020. Т. 17, № 4. С. 15–64.

Khitrov E.G., Andronov A.V., Khakhina A.M., Grigorev G.V. Mathematical Models of Interaction of Propellers of Machines with Soils. *Resources and Technology*, 2020, vol. 17, no. 4, pp. 15–64. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j2.art.2020.5422>

12. Хитров Е.Г., Андронов А.В., Хахина А.М., Григорьев Г.В. Комплексная оценка взаимодействия движителей машин с лесными грунтами на базе методов теории движения транспорта в условиях бездорожья // Resources and Technology. 2021. Т. 18, № 1. С. 1–52.

Khitrov E.G., Andronov A.V., Khakhina A.M., Grigorev G.V. A Comprehensive Assessment of Indicators of Interaction of Machine Movers with Forest Soils on the Basis of Methods of the Theory of Traffic in Off-road Conditions. *Resources and Technology*, 2021, vol. 18, no. 1, pp. 1–52. (In Russ.). <https://doi.org/10.15393/j2.art.2021.5442>

13. Хитров Е.Г., Котенев Е.В., Андронов А.В., Тарадин Г.С., Божбов В.Е. Теоретический расчет несущей способности связного грунта по конусному индексу и механическим свойствам // Изв. СПбЛТА. 2019. Вып. 226. С. 111–123.

Khitrov E.G., Kotenev E.V., Andronov A.V., Taradin G.S., Bozhbov V.E. Theoretical Calculation of the Bearing Capacity of Cohesive Soil by Cone Index and Mechanical Properties. *St. Petersburg Forestry Academy Bulletin*, 2019, iss. 226, pp. 111–123. (In Russ.).

14. Шапиро В.Я. Инвариантность принципов механики контактного разрушения при математическом моделировании процессов лесопромышленного комплекса // Наукосфера. 2022. № 2(1). С. 121–124.

Shapiro V.Ya. Invariance of Contact Fracture Mechanics Principles in Mathematical Modeling of Timber Industry Processes. *Naukosfera = Sciencesphere*, 2022, no. 2(1), pp. 121–124. (In Russ.).

15. Шапиро В.Я. Влияние анизотропии свойств оттаивающего почвогрунта на устойчивость трелевочного волока на склоне // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2023. № 63. С. 339–342.

Shapiro V.Ya. Influence of Anisotropy of Thawing Soil Properties on the Stability of a Skidder on a Slope. *Current problems of the forest complex*, 2023, no. 63, pp. 339–342. (In Russ.).

16. Шэнь Ю., Москаленко М.Б., Добрецов Р.Ю. Принципы построения шасси экстремальной проходимости для эксплуатации в лесном комплексе // Повышение эффективности лесного комплекса: материалы Восьмой Всерос. нац. науч.-практ. конф. с междунар. участием. Петрозаводск: ПетрГУ, 2022. С. 208–209.

Shen Yu., Moskalenko M.B., Dobretsov R.Yu. Principles of Construction of Extreme Terrain Chassis for Operation in the Forest Complex. *Improving the efficiency of the forest complex. Materials of the Eighth All-Russian National Scientific and Practical Conference with international participation*. Petrozavodsk, PetrSU Publ., 2022, pp. 208–209. (In Russ.).

17. Dobretsov R.Y., Lozin A.V., Kaninskii A.O., Rolle V.E. Steering Mechanisms with Alterable Kinematic Parameter. *Mechanisms and Machine Science (book series)*, 2022, vol. 108, pp. 512–521. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87383-7_55

18. Dobretsov R.Y., Porshnev G.P., Semenov A.G., Bulakh D.V., Bondar K.A. The Estimation of Main Parameters of the Power Plant and Electromechanical Powertrain for the Wheeled Vehicle. *International Review of Mechanical Engineering*, 2020, vol. 14, no. 2, pp. 139–145. <https://doi.org/10.15866/ireme.v14i2.18262>

19. Dobretsov R.Yu., Dobretsova S.B., Troyanovskaya I.P., Tikhonov E.A., Nuretdinov D.I. The Method of Expert Assessments as Applied to the Ranking of Technical Solutions in the Design of a Tractor Gearbox. *Journal of Physics: Conference Series. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations*. Krasnoyarsk, 2021. <https://doi.org/10.3233/AJW210033>

20. Kunickaya O., Hertz E., Kruchinin I., Tikhonov E., Ivanov N., Dolmatov N., Zorin M., Grigorev I. Pressure Control Systems for Tire Preservation in Forestry Machinery and Forest Soils. *Asian Journal of Water, Environment and Pollution*, 2021, vol. 18, no. 3, pp. 95–102. <https://doi.org/10.3233/AJW210033>

21. Ryabukhin P.B., Kunitskaya O.A., Burgonutdinov A.M., Makuev V.A., Sivtseva T.V., Zadrauskaite N.O., Gerts E.F., Markov O.B. Improving the Efficiency of Forest Companies by Optimizing the Key Indicators of Sustainable Forest Management: a Case Study of the Far East. *Forest Science and Technology*, 2022, vol. 18, no. 4, pp. 190–200. <https://doi.org/10.1080/21580103.2022.2128900>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest

Вклад авторов: Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи
Authors' Contribution: All authors contributed equally to the writing of the article